

Institut für Plasmaphysik  
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH  
des Landes Nordrhein-Westfalen

**Richtlinien für den Bau betriebssicherer Kondensator-  
batterien mit niedriger Induktivität und großem  
Energieinhalt**

von

H. Fay und E. Hintz

Jül - 71 - PP

Oktober 1962

Als Manuskript gedruckt





**Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr.71**

Institut für Plasmaphysik Jül – 71 – PP

Dok.: HEAVY - CURRENT CONDENSER BATTERIES

DK: 621.319.5

621.3.014.3

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich,  
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

# **Richtlinien für den Bau betriebssicherer Kondensator- batterien mit niedriger Induktivität und großem Energieinhalt**

von

H. Fay und E. Hintz

I. GRUNDSÄTZLICHER AUFBAU EINER NIEDERINDUKTIVEN  
KONDENSATORBATTERIE

II. BEDINGUNGEN FÜR DIE BETRIEBSSICHERHEIT HINSICHTLICH  
UNBEABSICHTIGTER ELEKTRISCHER KURZSCHLÜSSE

- 1) Sicherheit gegen Kurzschlüsse vor dem Zünden  
der Funkenstrecken
- 2) Sicherheit gegen Kurzschlüsse nach dem  
Zünden der Funkenstrecken
- 3) Niederinduktiver Aufbau einer gegen Kurz-  
schlüsse sicheren Batterie

III. BEDINGUNGEN FÜR DIE BETRIEBSSICHERHEIT HINSICHTLICH  
DER ZUVERLÄSSIGKEIT DER ALS SCHALTER VERWENDETEN  
FUNKENSTRECKEN

- 1) Spätzündende Funkenstrecken
- 2) Frühzündende Funkenstrecken

# I. GRUNDSÄTZLICHER AUFBAU EINER NIEDERINDUKTIVEN KONDENSATORBATTERIE

Eine niederinduktive Kondensatorbatterie besteht im Prinzip aus einer großen Anzahl parallel geschalteter Kondensatoren C, die über eine ebenfalls große Anzahl parallel angeordneter Schalter F auf die Last entladen werden. Im einfachsten Fall sind alle Kondensatoren direkt untereinander verbunden und werden über einen gemeinsamen Ladewiderstand  $R_L$  aufgeladen. Bei den benötigten Schaltzeiten von weniger als  $10^{-7}$  sec und den hohen zu schaltenden Strömen kommen nach dem jetzigen Stand der Technik nur Funkenstrecken als Schalter in Frage. Aus Gründen, die an anderer Stelle beschrieben worden sind <sup>1)</sup>, muß jede Funkenstrecke mit einer eigenen Leitung  $L_1$  von bestimmter Mindestlänge an die Last  $\mathcal{R}_s$  angeschlossen werden. Den beschriebenen Aufbau der Batterie zeigt Abb. 1. Darin bedeuten, außer den bereits genannten Elementen,  $L_f$  und  $L_c$  die Induktivitäten einer Funkenstrecke, bzw. eines Kondensators, und R die ohmschen Verlustwiderstände. Durch die Parallelschaltung aller N Kondensatoren, Funkenstrecken und Leitungen wird die Gesamtinduktivität  $L_i$  der Batterie, wenn N die Zahl der Elemente ist:

$$L_i = \frac{L_1 + L_f + L_c}{N}$$

$L_i$  kann bei genügend großem N sehr klein werden. Das aber ist von Interesse, weil die gespeicherte elektrische Energie (z.B. aus wirtschaftlichen Erwägungen) möglichst vollständig in der Last zur Verfügung stehen soll und daher für die komplexen Widerstände  $\mathcal{R}_s$  der Last,  $\mathcal{R}_i$  der Batterie gelten muß

$$\begin{aligned} \Re(\mathcal{R}_s) &\gg \Re(\mathcal{R}_i) \\ \Im(\mathcal{R}_s) &\gg \Im(\mathcal{R}_i) \end{aligned} \tag{1}$$



In den meisten Anwendungen sind die Widerstände überwiegend induktiv, so daß (1) übergeht in

$$L_s \gg L_i \quad (1a)$$

Typische Werte sind z.B.  $L_s = 10^{-8}$  H,  $L_i = 10^{-9}$  H.

Die Ladespannung solcher Batterien liegt, um einen möglichst großen Energieinhalt zu erreichen, im Hochspannungsbereich. Werte von mehr als 10 kV sind die Regel. Damit ergibt sich die Gefahr unbeabsichtigter Kurzschlüsse des Isoliermaterials, in die sich der gesamte Energieinhalt der Batterie explosionsartig (wegen der angestrebten niedrigen Induktivität) entladen würde. Die Möglichkeit solcher Durchschläge verhindert somit grundsätzlich den sicheren Betrieb einer Batterie großen Energieinhaltes, wenn sie nach dem oben beschriebenen Prinzip aufgebaut ist.

## II. BEDINGUNGEN FÜR DIE BETRIEBSSICHERHEIT HINSICHTLICH DER AUSWIRKUNGEN UNBEABSICHTIGTER ELEKTRISCHER KURZSCHLÜSSE

Um die in Abschnitt I genannten Nachteile zu vermeiden, muß die Batterie in einzelne Einheiten aufgeteilt werden, deren jede im Prinzip aus einer Kondensatorgruppe C, Funkenstrecke F und Verbindungsleitung  $L_1$  zur Last  $L_s$  besteht (Abb. 2). Vor dem Zünden der Funkenstrecken sind die einzelnen Kondensatorgruppen nur über hochohmige Ladewiderstände  $R_L$  miteinander und mit dem Ladegenerator verbunden. Erst im Augenblick des Zündens der Funkenstrecken werden die Kondensatorgruppen über die Verbindungsleitungen niederinduktiv miteinander verbunden und über die Last entladen.

### 1) Sicherheit gegen Kurzschlüsse vor dem Zünden der Funkenstrecken

Die Energie einer Kondensatorgruppe und damit die Zahl der Kondensatoren pro Gruppe wird so bemessen, daß der durch einen Kurzschluß verursachte Schaden auf die unmittelbare Umgebung der Kurzschlußstelle begrenzt bleibt. Da die Ladewiderstände hochohmig sind, führt die entsprechend langsame Entladung der übrigen Kondensatorgruppen in den Kurzschluß zu keinen zusätzlichen Zerstörungen.

Der auf diese Weise festgelegte maximale Energieinhalt einer Kondensatorgruppe liegt nach bisherigen Erfahrungen bei mindestens  $W_O = 20 \text{ kWsec}$ . Bei vorgegebenem Energieinhalt  $W_B$  der gesamten Kondensatorbatterie ist damit der Mindestwert für die Zahl  $N_e$  der Kondensatorgruppen durch  $W_B / W_O = N_{eO}$  gegeben, für eine Batterie von 10 MWsec also  $N_{eO} = 500$ .

### 2) Sicherheit gegen Kurzschlüsse nach dem Zünden der Funkenstrecken

In diesem Zusammenhang sollen nur die Auswirkungen eines Kurzschlusses in einer der Verbindungsleitungen betrachtet werden. (Kurzschlüsse im Kollektorsystem, das die Endender Verbindungsleitungen untereinander und mit der Last verbindet, bleiben unberücksichtigt.) Ein Kurzschluß kann an irgendeiner Stelle längs einer der Verbindungsleitungen auftreten. In ihn entlädt sich dann nicht nur die zu der defekten Leitung gehörende Kondensatorgruppe II, sondern auch ein Teil der Energie der restlichen Batterie I (Abb. 3), der sich aus der Parallelschaltung der Induktivitäten  $L_s$  und  $L_d$  von Last, bzw. Kurzschlußpfad bestimmen läßt. Die Entladung der zugehörigen Kondensatorgruppe ist ungefährlich, da deren Energie nach Abs. II. 1) ja hinreichend klein bemessen ist. Um auch die Entladung der restlichen Batterie in den Kurzschluß in ihrer Wirkung zu begren-

zen, muß die Induktivität  $L_d$  des Kurzschlußpfades groß gegenüber der Induktivität  $L_s$  der Last sein. Da im ungünstigsten Fall der Kurzschluß unmittelbar am Leitungsende auftreten kann, bedeutet diese Forderung, daß die Induktivität  $L_a$  des Anschlusses der Leitung an das Kollektorsystem groß gegenüber  $L_s$  sein muß, also

$$L_d \gg L_a \gg L_s \quad (2a)$$

Tritt der Kurzschluß irgendwo längs der Leitung auf, so addiert sich zu  $L_a$  die Induktivität  $L_b$  der Leitung vom Anschluß bis zur Kurzschlußstelle

$$L_d \gg L_a + L_b \gg L_s \quad (2b)$$

Das erste Ungleichheitszeichen in den Ungleichungen (2a) und (2b) wurde gewählt, weil bei geeigneter Konstruktion des Kollektorsystems noch zu  $L_a$  bzw.  $L_a + L_b$  eine im Kollektorsystem liegende Induktivität hinzukommt, Sollen die Auswirkungen des Kurzschlusses wiederum nicht größer sein, als wenn sich eine Energie  $W_o = 20 \text{ kWsec}$  in den Kurzschluß entlädt, so muß gelten

$$\frac{L_s}{L_s + L_d} = \frac{W_o}{W_B} = \frac{1}{N_{eo}} \quad (2c)$$

wo  $W_B$  wie früher die Gesamtenergie der Batterie und  $N_{eo}$  die Mindestzahl von Kondensatorgruppen bedeutet.

### 3) Niederinduktiver Aufbau einer gegen Kurzschlüsse sicheren Batterie

Die Forderung der Betriebssicherheit bzgl. unbeabsichtigter elektrischer Kurzschlüsse legt somit Mindestwerte für die Zahl  $N_e$  der Kondensatorgruppen und für die Induktivität  $L_a$  des Leitungsanschlusses fest. Die Ungleichung (1) bzw. (1a) läßt sich dann schreiben:



$$L_i = \hat{L}_a \left( \frac{L_a}{N_1} \right) + \frac{L_1}{N_1} + \frac{L_f}{N_e} + \frac{L_c}{N_e} \ll L_s \quad (1b)$$

Hierin ist  $L_c$  Induktivität einer Kondensatorgruppe

$L_f$  Induktivität einer Funkenstrecke

$L_1$  Induktivität einer Verbindungsleitung

$L_a$  Induktivität eines Leitungsanschlusses  
am Kollektorsystem

$\hat{L}_a$  Gesamtinduktivität aller Leitungsanschlüsse <sup>\*)</sup>

$N_1$  Anzahl der Leitungen, bzw. Leitungsanschlüsse

$N_e$  Anzahl der Kondensatorgruppen

$L_i$  Gesamtinduktivität der Batterie

$L_s$  Induktivität der Last

Die Ungleichung (1b) kann stets durch große Werte für  $N_e$  und  $N_1$  erfüllt werden. Nur für Batterien kleinen Energieinhaltes ist dabei  $N_e > N_{eo}$ , was aber die Sicherheit gegen elektrische Kurzschlüsse nur erhöht. Für große Batterien dürfte die Ungleichung stets mit dem Wert  $N_{eo}$  erfüllt sein. So würden für eine Batterie von 10 MWsec etwa folgende Daten gelten:

$$\begin{aligned} W_B &= 10^7 \text{ Ws} \\ W_o &= 2 \cdot 10^4 \text{ Ws} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{eo} &= 500 \\ N_1 &\sim 10^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_s &= 10^{-8} \text{ H} \\ L_a &\sim N_{eo} L_s \sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ H} \\ L_c &\sim 10^{-8} \text{ H} \\ L_f &\sim 10^{-8} \text{ H} \\ L_1 &\sim 10^{-6} \text{ H} \\ L_i &\sim 10^{-9} \text{ H} \end{aligned}$$

---

<sup>\*)</sup> Da die Leitungsanschlüsse am Kollektorsystem aus Platzgründen dicht aneinander liegen, ist ihr magnetischer Fluß teilweise verkoppelt, so daß die Abhängigkeit  $\hat{L}_a$  ( $L_a/N_1$ ) der Gesamtinduktivität  $\hat{L}_a$  aller Anschlüsse von der Zahl  $N_1$  der Leitungen durch die spezielle Konstruktion des Anschlußsystems gegeben ist.

Die Ungleichungen (2a, b, c) und (1b) lehren außerdem, daß es bezüglich der Sicherheit gegen Kurzschluß weit günstiger ist, anstelle einer möglichst kleinen Zahl von sehr niederinduktiven Leitungen eine möglichst große Zahl mit entsprechend höherer Induktivität zu verwenden.

### III. BEDINGUNGEN FÜR DIE BETRIEBSSICHERHEIT HINSICHTLICH DER ZUVERLÄSSIGKEIT DER ALS SCHALTER VERWENDETEN FUNKENSTRECKEN

Der in Abs. II beschriebene Aufbau einer Kondensatorbatterie wäre betriebssicher, wenn die als Schalter verwendeten Funkenstrecken wirklich alle innerhalb eines bestimmten Zeitintervalles  $\Delta T^*)$  nach dem Zünden der Hilfsentladung durchschlagen und damit eine dem Schließen eines Schalters entsprechende Funktion erfüllen würden. Nun ist aber der elektrische Durchschlag ein statistisches Phänomen. Es kann also der Durchschlag bereits eintreten, bevor die Hilfsentladung gezündet wurde, oder der Aufbau des Durchschlages sich über das zulässige Zeitintervall  $\Delta T$  hinaus verzögern, so daß die Funkenstrecke überhaupt nicht mehr zündet. Beide Fehlermöglichkeiten wie ihre Auswirkungen wurden an anderer Stelle <sup>2)</sup> ausführlich diskutiert.

#### 1) Spätzündende Funkenstrecken

Zündet eine Funkenstrecke nicht innerhalb des Zeitintervalles  $\Delta T$ , so erfolgt der Durchschlag erst beim Durchschwingen (d.h. in der 2. Viertelwelle) der Batterieentladung wegen der dann an der Funkenstrecke entstehenden Überspannung. Bei dem folgenden Einschwingvorgang der zugehörigen Kondensatorgruppe treten Über-

---

\*) Die Länge  $\Delta T$  dieses Zeitintervalles ist gleich der doppelten Laufzeit eines elektrischen Signales längs der Verbindungsleitungen von einer Funkenstrecke zum Kollektorsystem.

spannungen an den Kondensatoren auf, die bis zum 3-fachen der Kondensatorladespannung ansteigen und zur Zerstörung der Kondensatoren führen können. Um dies zu verhindern, sind mehrere Maßnahmen möglich:

- a) Es werden  $n$  Funkenstrecken pro Kondensatorgruppe verwendet. Damit wird die Wahrscheinlichkeit, daß alle  $n$  Funkenstrecken innerhalb  $\Delta T$  nicht zünden,  $W_n = w^n$ , wenn  $w$  diese Wahrscheinlichkeit für eine Funkenstrecke ist.  $W_n$  muß hinreichend klein sein <sup>\*)</sup>. Die Voraussetzungen für diese Maßnahme sind an anderer Stelle diskutiert (3).
- b) Die Hilfsentladung der Funkenstrecken brennt während der gesamten ersten Viertelwelle der Batterieentladung. Die brennende Hilfsentladung setzt die Durchschlagspannung einer Funkenstrecke auf etwa die Hälfte der statischen Durchschlagspannung herab. Eine nicht innerhalb der Zeit  $\Delta T$  gezündete Funkenstrecke schlägt somit bereits vor dem Durchschwingen der Batterieentladung, also noch während der ersten Viertelwelle, durch. Die dann noch an den Kondensatoren der zugehörigen Kondensatorgruppe entstehenden Überspannungen sind für die Kondensatoren ungefährlich.
- c) Mehrere Kondensatorgruppen werden durch Induktivitäten  $L$  untereinander verbunden. Versagt eine Funkenstrecke, so kann sich die zugehörige Kondensatorgruppe über  $L$  und die benachbarten Funkenstrecken entladen. Es kann daher über der nicht gezündeten Funkenstrecke keine Überspannung entstehen, d.h. sie zündet während des gesamten Entladungsverlaufes nicht mehr. Ebenso entstehen keine Überspannungen an den Kondensatoren. Über die Größe von  $L$  siehe den unter (3) zitierten Bericht. Wie viele Kondensatorgruppen durch Induktivitäten verbunden werden können, bzw. müssen, richtet sich einmal nach der in Abs. II beschriebenen Überlegungen bezüglich der Sicherheit gegen

---

<sup>\*)</sup> Wie klein  $W_n$ , bzw. wie groß  $n$  gewählt werden muß, ist in der unter 2) zitierten Arbeit angegeben.



unbeabsichtigte Kurzschlüsse, zum anderen nach der in Abs. III. 1a) gestellten Forderung, daß die Wahrscheinlichkeit für das Nichtzünden aller Funkenstrecken der miteinander verbundenen Kondensatorgruppen hinreichend klein sein muß.

## 2) Fröhzündende Funkenstrecken

Bei der Fröhzündung einer Funkenstrecke entsteht an der Lastspule eine Spannung

$$U_s = \frac{L_s}{L_e + L_s} \cdot U_o$$

Hierin ist  $U_o$  die Ladespannung der Batterie,  $L_e$  die Induktivität der Batterieeinheit (Kondensatoren, Funkenstrecken und Leitungen), die zu der fröhzündenden Funkenstrecke gehört und  $L_s$  die Induktivität der Lastspule. Beim Durchschwingen von  $U_s$  entsteht an den restlichen Funkenstrecken der Batterie eine Spannung  $U_o + \gamma U_s$ , wo  $\gamma = \exp(-\rho \frac{\Pi}{\omega}) < 1$  das Dämpfungsverhältnis der Schwingung beschreibt. Ist diese Spannung kleiner als die statische Durchschlagsspannung  $U_{Stat}$  der Funkenstrecken,

$$U_o + \gamma U_s < U_{Stat} \quad (5a)$$

so kann die Entladung der zu früh gezündeten Batterieeinheit die übrigen Funkenstrecken nicht zum Durchschlag bringen. Die Fröhzündung bleibt ohne nachteilige Folgen. Im anderen Fall werden die restlichen Funkenstrecken in einer nicht übersehbaren zeitlichen Folge gezündet, wobei die unter Abs. III. 1) beschriebenen Verhältnisse mit allen Gefahren auftreten können, die mit dem Spätzünden einer Funkenstrecke verbunden sind. Die Bedingung (5a) kann mit  $U_o = a U_{Stat}$  ( $a < 1$ ) umgeformt werden in

$$\begin{aligned} a + \gamma a \frac{L_s}{L_s + L_e} &< 1 \\ \frac{L_s}{L_s + L_e} &< \frac{1 - a}{a \gamma} \sim 0,12 \end{aligned} \quad (5b)$$

für  $a = 0,9$ ,  $\gamma = 0,9$ .

Die Bedingung ist somit stets erfüllt, wenn die Batterie nach den in Abs. II beschriebenen Gesichtspunkten für die Sicherheit gegen Kurzschluß aufgebaut ist.

#### L I T E R A T U R

- 1) E. Hintz, H. Beerwald

The Three Electrode Spark Gap and Its Application for the Simultaneous Switching of Many Parallel Spark Gaps.

Proc. IV Int. Conf. Ionization Phenomena in Gases, Uppsala 1959

- 2) H. Fay, E. Hintz

Transient Phenomena Connected With the Operation of Large Low Inductance Condenser Banks.

Symposium on Engineering Problems in Thermonuclear Research, A.E.R.E., Harwell 1960

- 3) W. Anger, H. Fay

In Vorbereitung

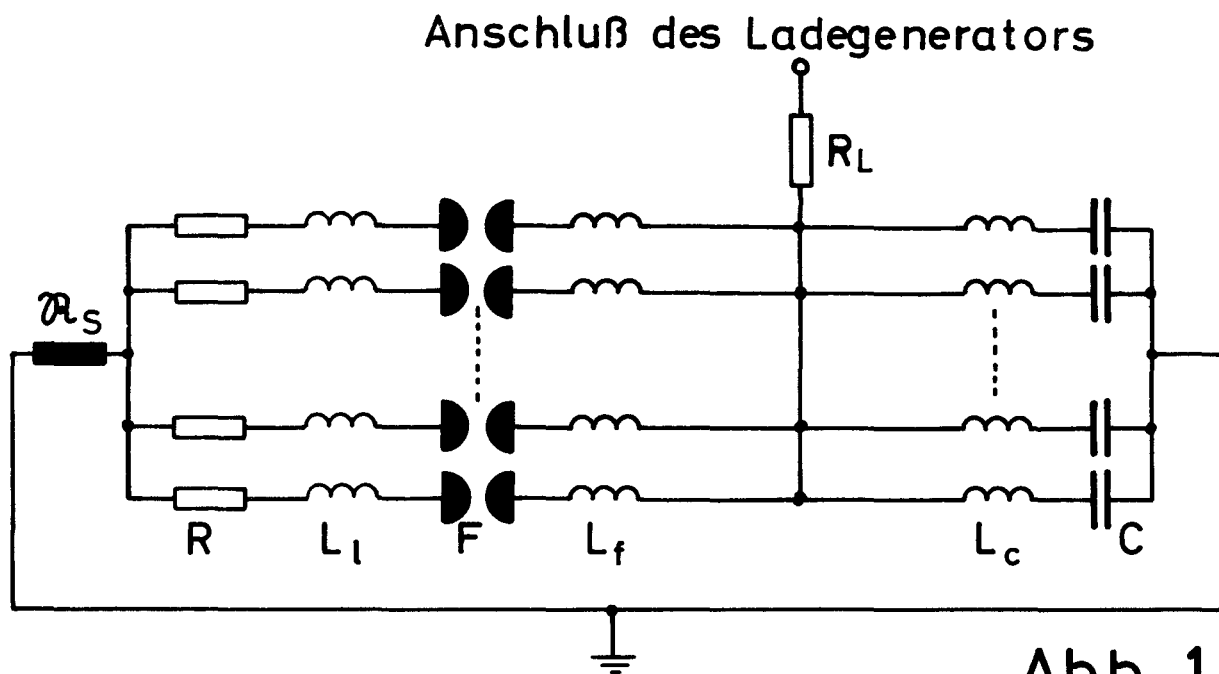


Abb. 1

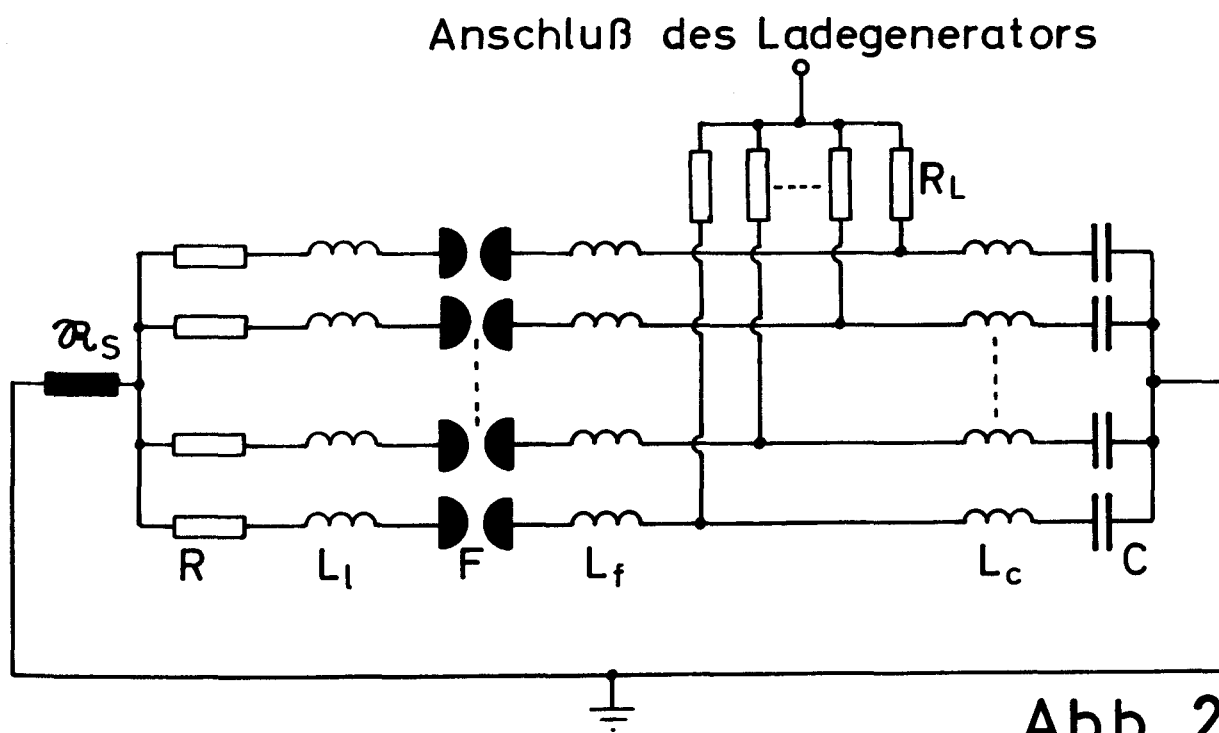


Abb. 2

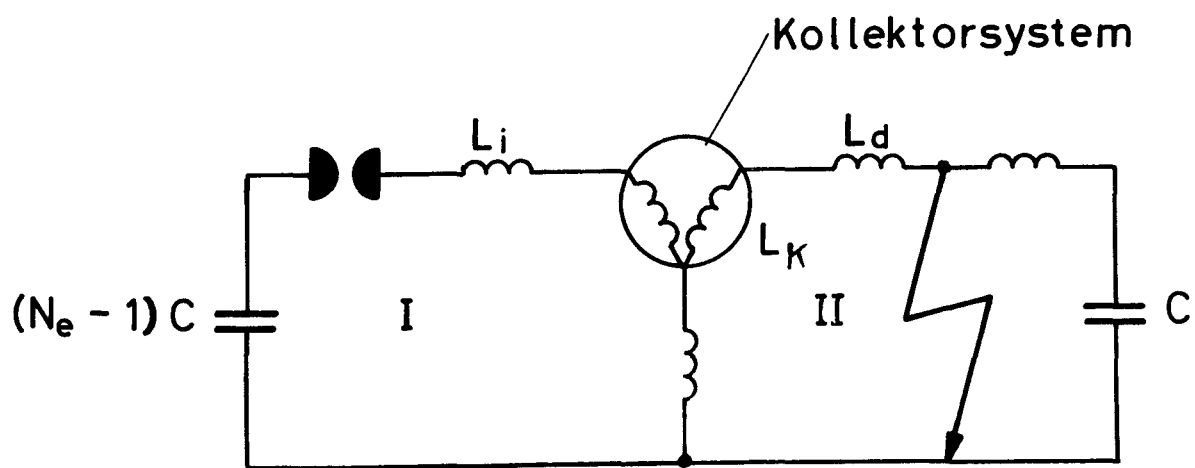


Abb. 3